

Энергетические характеристики лазерно-кислородной резки стали излучением CO₂-лазера

А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев

Исследован баланс энергий при лазерно-кислородной резке стальных листов толщиной 5–16 мм. Определены необходимые затраты энергии и термический КПД процесса при параметрах резки, обеспечивающих минимальную шероховатость (характерную высоту неоднородностей) поверхности реза. Установлено, что при минимальной шероховатости отношения компонент уравнения баланса энергий не зависят от толщины листа. Определена также доля окисленного железа в удаляемом расплаве.

Ключевые слова: лазерная резка, CO₂-лазер, качество реза, баланс энергий.

1. Введение

Лазерная резка отличается от других способов резки материалов сочетанием высокой скорости и высокого качества поверхности реза. В последние годы достигнут значительный прогресс в использовании дисковых и волоконных твердотельных лазеров для резки металлов. По сравнению с CO₂-лазерами эти лазеры позволяют резать тонкие (толщиной до ~5 мм) листы с большей скоростью. Однако при разрезании толстых листов эффективность использования твердотельных лазеров существенно снижается, а по качеству реза они значительно уступают CO₂-лазерам. По мнению большинства исследователей, причиной этого являются особенности поглощения излучения с длинами волн 1.06–1.08 мкм в канале реза при наклонном падении излучения и значительное уменьшение коэффициента поглощения при увеличении толщины листа [1, 2]. К настоящему времени CO₂-лазеры являются единственным инструментом для высококачественной лазерной резки металлических листов разной толщины, включая и толстые листы.

В наших предыдущих работах [3–5] сформулирован количественный критерий качества реза – минимальная шероховатость поверхности при полном отсутствии графа (застывшие капли расплава на нижней кромке реза), и на его основе впервые проведена комплексная оптимизация резки стали толщиной до 25 мм излучением CO₂-лазера, а также найдены безразмерные параметры, определяющие получение минимальной шероховатости стенок реза.

Настоящая работа завершает начатый в [3–5] цикл исследований лазерной резки толстых стальных листов излучением CO₂-лазера и посвящена экспериментальному определению энергетической эффективности процесса

резки на основе измерения баланса энергий в оптимальных условиях минимальной шероховатости. Такие исследования необходимы для оптимизации затрат энергии при резке, что особенно актуально при невысоком по сравнению с волоконными и дисковыми лазерами КПД CO₂-лазера.

2. Постановка задачи и методика эксперимента

При лазерной резке происходит локальное плавление материала и удаление расплава струей вспомогательного газа. Резка толстых листов углеродистой или низколегированной стали проводится, как правило, в струе кислорода (лазерно-кислородная резка). В этом случае экзотермическая реакция окисления железа также является источником энергии, сравнимой с энергией лазерного излучения. Весь процесс представляет собой вынужденное горение железа в кислороде [6].

Уравнение баланса мощностей при лазерно-кислородной резке можно записать в виде [7, 8]

$$AW + W_{\text{ox}} = W_{\text{m}} + W_{\text{cond}}, \quad (1)$$

где W – мощность лазерного излучения; A – интегральный коэффициент поглощения излучения в канале реза; W_{ox} – мощность, выделяемая при окислении железа; W_{m} – мощность, затрачиваемая на плавление металла в зоне реза; W_{cond} – мощность, расходуемая на нагрев металла вне зоны реза. В развернутом виде уравнение баланса выглядит следующим образом:

$$AW + Vb\rho\delta_{\text{ox}}\Delta H = Vb\rho(c\Delta T + L_f) + W_{\text{cond}}, \quad (2)$$

где V – скорость резки; b – средняя ширина реза; h – толщина листа; ρ – плотность материала; c – удельная теплоемкость материала при комнатной температуре; $L_f = 275$ Дж/г – удельная теплота плавления материала; δ_{ox} – доля окисленного железа в удаляемом расплаве; ΔH – удельная теплота реакции окисления (в Дж/кг); $\Delta T = T_{\text{m}} - T_0$; T_{m} – температура плавления материала (в °С); T_0 – температура окружающей среды.

А.Г.Маликов, А.М.Оришич, В.Б.Шулятьев. Институт теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича СО РАН, Россия, 630090 Новосибирск, ул. Институтская, 4/1; e-mail: shulyat@rambler.ru

Поступила в редакцию 29 декабря 2011 г., после доработки – 12 апреля 2012 г.

Уравнение баланса может быть упрощено путем введения обобщенных безразмерных переменных. В [9, 10] рассчитаны потери энергии за счет теплопроводности в условиях лазерной резки и показано, что выражение для тепловых потерь может быть записано в виде $W_{\text{cond}}/(\lambda h \Delta T) = f(\text{Pe})$, где $\text{Pe} = Vb/\chi$ – число Пекле; $\chi = \lambda/(\rho c)$ – температуропроводность материала; λ – его теплопроводность. Число Пекле можно рассматривать как безразмерную скорость резки. Введя также безразмерную мощность излучения $Q = W/(\lambda h T_m)$ и приняв, что $T_0 = 0$ и температура расплава $T_{\text{mf}} = T_m$, уравнение баланса энергий можно записать в безразмерном виде [9]:

$$AQ = \text{Pe} \left(1 + \frac{L_f - \delta_{\text{ок}} \Delta H}{c T_m} \right) + f(\text{Pe}). \quad (3)$$

Таким образом, уравнение баланса (3) включает в себя теплофизические характеристики материала и только две безразмерные переменные (Q и Pe), которые определяются задаваемыми параметрами резки W , V , h и шириной реза b .

Эксперименты по измерению оптимальных значений обобщенных переменных описаны в [3–5]. Согласно полученным результатам, при толщине разрезаемых листов $h = 5$ – 25 мм минимум шероховатости достигается в том случае, когда выполняются условия $Q \approx \text{const}$ и $\text{Pe} \approx \text{const}$. При этом оптимальные значения Q и Pe одинаковы для всех толщин: $Q_{\text{opt}} \approx 1.6$, $\text{Pe}_{\text{opt}} \approx 0.5$. При толщине листа $h = 5$ мм минимальная шероховатость $R_z = 8$ – 10 мкм, а при $h = 10$ – 24 мм она растет почти линейно с увеличением толщины листа.

Наибольшую трудность в определении энергетического баланса (1) представляет измерение доли $\delta_{\text{ок}}$ окисленного железа и, следовательно, вклада экзотермической реакции окисления в общий баланс. Поэтому величины AQ , W_m и W_{cond} измерялись экспериментально, а величина $W_{\text{ок}}$ вычислялась из уравнения баланса.

В экспериментах использовался непрерывный CO₂-лазер с самофильтрующим резонатором и параметром качества пучка $\text{BPP} = 4.7$ мм·мрад [11]. Лазер генерировал плоскополяризованное излучение, которое превращалось затем в излучение с круговой поляризацией при помощи фазосдвигающего зеркала. Резка проводилась излучением с круговой поляризацией традиционным способом – с использованием линзовой фокусирующей системы, при этом вдоль оси лазерного пучка подавался кислород с концентрацией 99.999%. Разрезались листы низкоуглеродистой стали Ст.3пс толщиной 5, 10 и 16 мм.

Для листов разной толщины параметры резки выбирались в соответствии с установленными в [3] критериями получения минимальной шероховатости поверхности реза. Экспериментальные значения W , V , b и избыточного давления кислорода Δp в форкамере режущей головки для толщины листа h приведены в табл. 1.

При расчете числа Пекле в качестве ширины реза использовалось среднее значение между его ширинами на

верхней и нижней поверхностях листа. Мощность W_m можно определить из выражения

$$W_m = Vhb\rho(c\Delta T_f + L_f), \quad (4)$$

где $c = 0.66$ Дж·г⁻¹·К⁻¹ – средняя удельная теплоемкость металла в процессе резки; $\Delta T_f = T_{\text{mf}} - T_0$ – разность температур расплава и окружающей среды. Согласно [12] в случае небольших скоростей V значение T_{mf} может составлять ~ 1900 К. В результате подстановки в (4) значений скорости резки и ширины реза для листов различной толщины, взятых из табл. 1, определялась мощность, необходимая для плавления металла.

Для определения потерь мощности W_{cond} за счет теплопроводности применялся калориметрический метод: от стальной пластины толщиной h в течение времени τ отрезался образец длиной l , после чего находились значения затрачиваемой на нагрев материала в процессе резки энергии E_g (с помощью калориметра) и мощности (из соотношения $W_{\text{cond}} = 2E_g/(Vl) = 2E_g/\tau$). Множитель 2 в соотношении для W_{cond} учитывает потери тепла в двух направлениях от реза. В работе [13] проведен детальный анализ точности данного метода измерения энергии. Показано, что потери энергии за счет конвективного охлаждения как технологическим газом, так и окружающим воздухом малы при условии нагрева образцов до температуры не выше 100°C.

Тем не менее, для контроля возможных потерь тепла в разрезаемых образцах, например за счет конвективного теплообмена с окружающим воздухом, измерения проводились для восьми образцов различной массы и определялось среднее значение мощности W_{cond} .

В настоящей работе коэффициенты поглощения лазерного излучения для стальных листов толщиной 5, 10 и 16 мм измерялись с помощью методики, подробно описанной в [14]. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1.

Суть данной методики состоит в следующем. Прошедшее через канал реза излучение попадало на приемник, в настоящей работе – измеритель мощности OPHIR 5000W-CAL-SH. При этом контролировались диаметр и отклонение пучка при взаимодействии излучения с материалом в процессе резки, что обуславливало попадание на приемник всего излучения, прошедшего через зону реза. Продукты горения металла сдувались струей воздуха, что исключало их попадание на приемник.

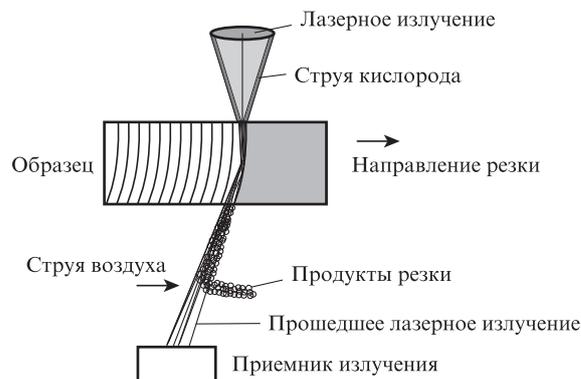


Рис. 1. Схема измерения коэффициента поглощения лазерного излучения в канале реза.

Табл. 1. Параметры резки.

h (мм)	W (Вт)	V (мм/с)	b (мм)	Δp (МПа)
5	1000	24.17	0.530	0.050
10	2000	18.33	0.725	0.050
16	3000	15.0	0.958	0.04

3. Результаты

Результаты проведенных измерений W_{cond} для образцов толщиной 5, 10 и 16 мм с максимально различающимися массами M представлены в табл.2. При расчете $E_{\text{г}}$ использовалась удельная теплоемкость $c = 0.46 \text{ Дж} \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ для холодного металла. В эксперименте разрезались образцы разной ширины и, следовательно, разной массы. Из приведенных в табл.2 данных следует, что изменение увеличения температуры образцов ΔT_2 после резки в 2–3 раза при постоянной толщине h разрезаемого стального листа слабо влияет на W_{cond} . Это позволяет предположить, что конвективное охлаждение незначительно влияет на измеряемую величину W_{cond} . Разброс экспериментальных значений W_{cond} при измерениях для восьми образцов не превышал $\pm 6\%$.

На рис.2 представлены результаты измерений коэффициента поглощения излучения CO_2 -лазера при резке образцов различной толщины. В табл.3 и на рис.3 приведены данные по основным потокам энергии при лазерной резке с использованием кислорода листов стали толщиной 5, 10 и 16 мм. В табл.3 приведены также термический КПД процесса резки $\eta_t = W_m / (AW + W_{\text{ox}})$ и доля энергии реакции окисления в общем вкладе энергии $\delta_E = W_{\text{ox}} / (AW + W_{\text{ox}})$.

Из рис.3 видно, что все компоненты уравнения баланса (1) имеют близкую к линейной зависимость от толщины листа, т.е. отношения компонент не зависят от толщины листа. Это позволяет объяснить тот факт, что в условие минимума шероховатости $Q_{\text{opt}} = W / (\lambda h T_m)$, детально исследованное ранее [3–5], входит только мощность W лазерного излучения. Поскольку минимальная шероховатость достигается для всего диапазона толщин при примерно одинаковых значениях Q_{opt} и Re_{opt} [3], их отношение

Табл.2. Результаты измерений W_{cond} при различных толщинах листа.

h (мм)	M (г)	l (см)	τ (с)	W_{cond} (Вт)	ΔT_2 (°C)
5	186.9	10.4	4.2	873	21.2
	90.6	10.0	4.0	778	37.4
10	95.8	9.5	5.2	1533	90.2
	349.8	9.5	5.2	1749	28.0
16	243.3	9.0	6.0	2697	72.3
	629.8	8.9	6.0	2937	30.2

Табл.3. Измеренные значения компонент уравнения баланса мощностей (1).

h (мм)	W (Вт)	AW (Вт)	W_{ox} (Вт)	W_m (Вт)	W_{cond} (Вт)	δ_E	η_t
5	1000	650	833	664	819.9	0.56	0.43
10	2000	1500	1478	1370	1608	0.5	0.46
16	3000	2490	2724	2377	2837	0.52	0.45

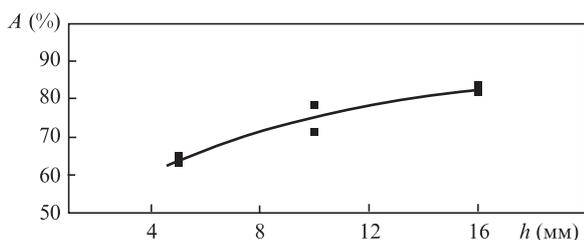


Рис.2. Коэффициент поглощения A излучения CO_2 -лазера в канале реза при различных толщинах h листа. Точки – экспериментальные значения, сплошная кривая – их аппроксимация.

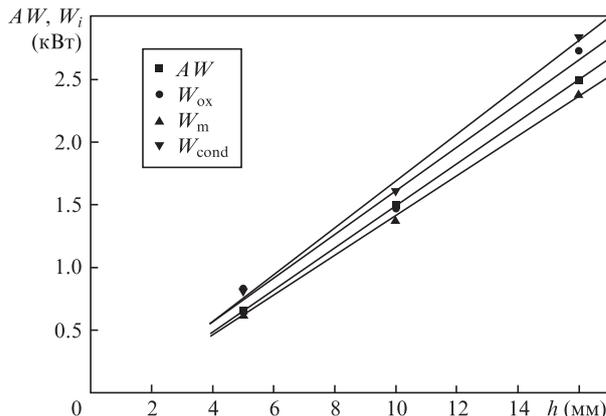


Рис.3. Измеренные зависимости компонент уравнения баланса мощностей (1) от толщины листа.

$E = Q_{\text{opt}} / \text{Re}_{\text{opt}}$ остается постоянным. Величина E представляет собой безразмерную мощность лазерного излучения, вкладываемую в единицу объема удаляемого материала. С учетом уравнения баланса (2) и соотношения (4) для W_m получаем

$$E = \frac{1}{A} (1 + \text{Sf}) \left(1 + \frac{W_{\text{cond}}}{W_m} - \frac{W_{\text{ox}}}{W_m} \right), \quad (5)$$

где $\text{Sf} = L_f / (c T_m)$ – число Стефана.

В данных опытах при условии резки с максимальным качеством (с минимальной шероховатостью) входящие в (5) отношения компонент энергетического баланса остаются постоянными при изменении толщины разрезаемого листа. Поскольку $A \approx \text{const}$, то из (5) следует условие $E \approx \text{const}$, что и наблюдалось в эксперименте [3].

Независимость компонент энергетического баланса от толщины листа имеет несколько следствий:

1. При условии минимальной шероховатости поверхности реза для всего диапазона толщин термический КПД процесса резки η_t остается постоянным. Примерно 45% всей вложенной энергии затрачивается на плавление металла, остальная энергия отводится из зоны реза в результате теплопроводности и расходуется на нагрев образца.

2. Доля δ_E энергии реакции окисления в общем вкладе энергии также примерно одинакова для всех трех толщин листа (табл.3).

3. Одинаковой для разных толщин является и доля окисленного железа δ_{Fe} . При лазерно-кислородной резке низкоуглеродистой стали окислы FeO составляют более 95% всех окислов [12, 14]. Величина δ_{Fe} определена как отношение $W_{\text{ox}} / W_{\text{ox}}^{\text{tot}}$, где $W_{\text{ox}}^{\text{tot}} = V h b \rho (E_{\text{O}_2} / M_{\text{Fe}})$ – параметр, равный мощности, которая выделилась бы при сгорании всего удаляемого железа; $M_{\text{Fe}} = 55.8 \text{ г/моль}$ – молярная масса железа; $E_{\text{O}_2} = 254 \text{ кДж/моль}$ – энергия реакции окисления $\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 = \text{FeO} + E_{\text{O}_2}$ [7, 12]. Результаты расчета δ_{Fe} приведены в табл.4, где использованы обозначения объемного (dQ^{Fe}/dt) и массового (dM^{Fe}/dt) расходов металла при лазерной резке. Из нее следует, что только 30%–35% железа окисляется и вносит вклад в полный энергетический баланс лазерной резки. Часть металла может дополнительно окислиться, например двигаясь в виде капель в потоке кислорода, но этот процесс уже не оказывает влияния на нагрев разрезаемого листа.

Оценим также, какое количество кислорода необходимо для окисления 30% удаляемого металла. Для окисле-

Табл.4. Расходы кислорода и металла в процессе резки.

<i>h</i> (мм)	$d\Omega^{Fe}/dt$ (мм ³ /с)	dM^{Fe}/dt (г/с)	W_{ox}^{tot} (Вт)	δ_{Fe} (%)	dM^{O_2}/dt (г/с)	$dM_{gas}^{O_2}/dt$ (г/с)
5	64.0	0.500	2304	36	0.051	0.07
10	132.7	1.035	4777	30	0.088	0.13
16	229.9	1.790	8276	33	0.168	0.23

ния количества железа, равного 1 моль, необходимо количество молекулярного кислорода, равное 0.5 моль.

Массовый расход кислорода dM^{O_2}/dt , необходимый для окисления железа, можно найти из выражения

$$\frac{dM^{O_2}}{dt} = 0.5\delta_{Fe} \frac{dM^{Fe}}{dt} \frac{M_{O_2}}{M_{Fe}},$$

где $M_{O_2} = 32$ г/моль – молярная масса кислорода. Результаты расчета представлены в табл.4. Там же приведены результаты расчета величины $dM_{gas}^{O_2}/dt$ (количество кислорода, поступающего в зону резки), которая была оценена из следующих выражений:

$$\frac{dM_{gas}^{O_2}}{dt} \approx \frac{\pi b^2}{4} \rho_{gas} V_{gas},$$

$$V_{gas}^2 = \frac{2C_0^2}{k-1} \left[1 - \left(\frac{p_{atm}}{p_{atm} + \Delta p} \right)^{(k-1)/k} \right].$$

Здесь V_{gas} – скорость течения кислорода в канале реза, найденная с помощью уравнения Бернулли; ρ_{gas} – плотность кислорода; C_0 – скорость звука в кислороде; k – показатель адиабаты; p_{atm} – давление окружающей среды.

В условиях нашего эксперимента (см. табл.1) при $\rho_{gas} = 1.4 \times 10^{-6}$ г/мм³ получаем $V_{gas} = 2.40 \times 10^5$ мм/с и значения $dM_{gas}^{O_2}/dt$, приведенные в табл.4. Представленные данные показывают, что количество кислорода, поступающего через сечение площадью $\pi b^2/4$, лишь в 1.5 раза превышает количество кислорода, расходуемого на окисление железа. Поскольку реальное течение кислорода в канале реза и его взаимодействие с поверхностью в полученной оценке не учитываются, расчет дает оценку сверху, и можно предположить, что именно количество подводимого к образцу кислорода ограничивает массу окисленного железа.

4. Обсуждение результатов

Из рис.3 видно, что и поглощенная лазерная мощность, и мощность, выделяющаяся в реакции окисления, при минимальной шероховатости растут линейно с толщиной листа. Доля окисленного железа остается при этом постоянной. Как показали приведенные выше оценки, при толщинах 5–15 мм и давлении кислорода 0.05 МПа расход кислорода всего в 1.5 раза превышает расход, необходимый для создания той степени окисления железа, которая наблюдается в эксперименте. При толщинах листа более 15–20 мм давление кислорода приходится уменьшать [3,4]. Это делается для предотвращения перегрева материала в верхней части реза и перехода процесса резки в неконтролируемый режим с большой величиной шероховатости [8]. Таким образом, с увеличением толщины уменьшается доля энергии химической реакции в общем энергобалансе и нарушается энергетическое условие качественного реза. Кроме того, при уменьшении доли окисленного металла возрастает вязкость и коэффициент по-

верхностного натяжения расплава [15], что затрудняет удаление расплава и может вызывать возрастание шероховатости и появление грата. Обе эти причины могут приводить к ограничению максимальной толщины качественно разрезаемого листа.

Существенное отличие лазерной резки толстых листов от резки тонких листов (толщиной меньше 3–5 мм) состоит в том, что скорость резки, форма поверхности реза и ее шероховатость в значительной степени определяются процессами удаления расплава из канала реза. Физика таких процессов сложна и еще до конца не ясна [16,17]. Существенное влияние на образование рельефа оказывает характер течения расплава [16]. Режим течения (ламинарный или турбулентный) характеризуется числом Рейнольдса Re , которое представляет собой отношение сил инерции к силам вязкого трения. Течение расплава на фронте реза можно рассматривать как безнапорное течение в прямоугольной трубе. Для безнапорного течения число Рейнольдса определяется следующим образом [18]:

$$Re = R V_m / \nu, \tag{6}$$

где R – гидравлический радиус; V_m и ν – скорость течения и кинематическая вязкость расплава. Гидравлический радиус определяется как отношение площади «живого» сечения потока к смоченному периметру [18]: $R = h_m / (1 + 2h_m/b)$, где h_m – толщина пленки расплава.

Согласно результатам настоящей работы, доля окисленного железа при минимальной шероховатости остается постоянной для всего диапазона толщин и равна 0.3–0.35. Более 95% окислов являются окислами FeO. Диапазон скоростей резки, при которых измерялся энергетический баланс и шероховатость поверхности минимальна, составляет 15–24.2 мм/с. При скоростях резки менее ~33 мм/с температура пленки расплава слабо зависит от скорости: она меняется в пределах 1900–1940 К [11]. При этом изменение вязкости расплава не превышает 10%, и средние значения вязкости в указанном диапазоне температур равны 1.1×10^{-6} м²/с для Fe и 10^{-6} м²/с для FeO [15].

Для определения скорости V_m течения расплава положим, как это делается при такого рода оценках, что расплав удаляется под действием силы давления вспомогательного газа [16]: $\rho_m V_m^2 / 2 \approx \Delta p$, где ρ_m – плотность вещества расплава, а Δp – перепад давления на длине канала. Воспользуемся также законом сохранения массы для грубой оценки величины h_m : $V_m h_m = Vh$. В результате получим оценки чисел Рейнольдса: $Re \approx 100–260$ для Fe и 90–220 для FeO.

Безнапорное течение является ламинарным, если число Рейнольдса не превышает 580 [18]. Учитывая, что с ростом толщины листа перепад давления Δp , а следовательно, и скорость газа, только уменьшаются, можно считать, что в условиях лазерной резки с максимальным качеством числа Рейнольдса не достигают критических значений.

Одним из критериев качества реза в настоящей работе, наряду с минимальной шероховатостью, является отсутствие грата. Если силы поверхностного натяжения расплава достаточно велики, часть расплава не уносится с кромки листа, а остается в виде застывших капель и образует грат. Соотношение сил поверхностного натяжения и сил инерции расплава характеризуется числом Вебера

$$We = \frac{h_m \rho_m V_m^2}{\sigma}, \tag{7}$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения вещества расплава [19].

С учетом приведенных выше оценочных соотношений для параметров пленки расплава число Вебера можно связать с экспериментально измеренными параметрами следующим образом:

$$We = \frac{Vh\sqrt{2\rho_m\Delta p}}{\sigma}. \quad (8)$$

Результаты оценок по формуле (8) дают $We \approx 5-11$ для Fe и 2–4 для FeO при $h = 5-16$ мм.

Для того чтобы расплав надежно удалялся из канала реза и с кромки листа, число Вебера должно превышать некоторое критическое значение, которое в условиях лазерной резки равно 2.2 [18]. Как видно из приведенной оценки, условия удаления расплава с кромки листа в нашем эксперименте выполняются.

Отметим еще одно важное обстоятельство. Из рис.3 видно, что все удельные, т.е. отнесенные к толщине листа, мощности примерно равны. Можно предположить, что такая энергетическая сбалансированность процесса лазерной резки стали с использованием кислорода является одним из условий получения минимальной шероховатости поверхности.

5. Заключение

В работе впервые проведено комплексное исследование баланса мощностей в процессе лазерно-кислородной резки стальных листов большой толщины при оптимальных параметре $W/h = 200$ Вт/мм и числе Пекле $Re_{opt} = 0.5$, соответствующих минимальной шероховатости поверхности реза. В наших экспериментах впервые получены следующие результаты:

1. Измерен коэффициент поглощения излучения CO_2 -лазера при резке листов стали толщиной 5–16 мм.

2. Показано, что при резке с минимальной шероховатостью доля окисленного железа составляет 30%–36%, причем в пределах ошибки измерений она не зависит от толщины металла.

3. Установлено, что при лазерной резке стали все компоненты уравнения баланса мощностей (поглощенная мощность излучения лазера AW , мощность экзотермической реакции окисления железа кислородом W_{ox} , затрачиваемая на плавление металла в зоне реза мощность W_m , расходуемая на нагрев металла вне зоны реза мощность W_{cond}), отнесенные к толщине листа, не зависят от h .

4. Показано, что удельные мощности (AW/h , W_m/h , W_{cond}/h , W_{ox}/h) для листов толщиной 5, 10 и 16 мм имеют близкие значения. Разброс экспериментальных значений этих величин находится в интервале 130–170 Вт/мм. Мож-

но предположить, что такой результат обусловлен выбранными режимами резки [3–4], соответствующими минимальной шероховатости поверхности реза. Отклонение от оптимального значения отношений компонент уравнения баланса и преобладание какого-либо одного фактора, например излишка мощности экзотермической реакции окисления железа кислородом или возрастания W_{cond} , могут приводить к ухудшению качества поверхности вследствие перегрева зоны реза и возникновения неконтролируемого горения.

5. Выполнен качественный анализ полученных результатов. Сделанные оценки чисел Рейнольдса и Вебера для условий эксперимента показали, что при резке с минимальной шероховатостью и без образования грата режим течения расплава на фронте реза является ламинарным и выполняется условие отрыва капель от нижней кромки реза, благодаря чему на кромке не образуется грат.

- Mahrle A., Beyer E. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 175507 (2009).
- Petring D., Schneider F., Norber W., Nazery V. *Proc. 27th Int. Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics ICALEO-2008* (Temecula, CA, USA, 2008, p. 95).
- Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **39**, 547 (2009).
- Malikov A.G., Orishich A.M., Shulyatyev V.B. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **49**, 1152 (2009).
- Фомин В.М., Маликов А.Г., Оришич А.М., Шулятьев В.Б. *Докл. РАН*, **428**, 295 (2009).
- Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михайлеску Й. *Взаимодействие лазерного излучения с металлами* (М.: Наука, 1988, с. 137).
- Ready J.F. (Ed.) *LIA Handbook of Laser Material Processing* (Orlando: LIA Magnolia Publishing Inc., 2001, с. 429).
- Steen W.M. *Laser Material Processing* (London: Springer-Verlag, 1991, с. 76).
- Prusa J.M., Venkitachalam G., Molian P.A. *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **39**, 431 (1999).
- Schulz W., Becker D., Franke J., Kemmerling R., Herziger G. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **26**, 1357 (1993).
- Афонин Ю.В., Гольшев А.П., Иванченко А.И., Оришич А.М., Малов А.Н., Оришич А.М., Печурин В.А., Филёв В.Ф., Шулятьев В.Б. *Квантовая электроника*, **34**, 307 (2004).
- Powell J., Petring D., Kumar R.V., Al-Mashikhi S.O., Kaplan A.F.H., Voisey K.T. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **42**, 015504 (2009).
- Базылева И.О., Галушкин М.Г., Голубев В.С., Дубровина Е.А., Карасев В.А. В сб.: *Современные лазерно-информационные и лазерные технологии. Труды института проблем лазерных и информационных технологий* (М.: Интерконтакт Наука, 2005, с. 221).
- Miyamoto I., Maruo H. *Welding in the World*, **29**, 283 (1991).
- Ivarson A., Powel J., Kamalu J., Magnusson C. *J. Mater. Proc. Technol.*, **40**, 359 (1994).
- Голубев В.С. В сб.: *Глубокое каналирование и филаментация мощного лазерного излучения в веществе* (М.: Интерконтакт Наука, 2009, с. 103).
- Schulz W., Marcus N., Epplet U., Kowalick K., in *The Theory of Laser Material Processing* (Dordrecht: Springer, 2009, p. 339).
- Штеренлихт Д.В. *Гидравлика* (М.: Энергоатомиздат, 1991, с. 119).
- Riveiro A., Quintero F., Lusquinos F., Comesana R., Pou J. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **44**, 135501 (2011).